



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

21 Aktenzeichen: 101 04 193.4  
22 Anmeldetag: 31. 1. 2001  
43 Offenlegungstag: 1. 8. 2002

- 71 Anmelder:  
Max Planck-Gesellschaft zur Förderung der  
Wissenschaften e.V., 80539 München, DE
- 74 Vertreter:  
Manitz, Finsterwald & Partner GbR, 80336 München
- 72 Erfinder:  
Zacharias, Margit, Dr., 06118 Halle, DE
- 56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:  
YUN,F.,et.al.: Study of structural and optical  
properties of nanocrystalline silicon embedded  
in SiO<sub>2</sub>. In: Thin Solid Films 375, 2000,  
S.137-141;  
YUN,Feng,et.al.: Room Temperature  
Single-Electron  
Narrow-Channel Memory with Silicon Nanodots  
Embedded in SiO<sub>2</sub> Matrix. In: Jpn. J. Appl.  
Phys., Vol.39, 2000, S.L792 - L795;  
ZHU,M.,et.al.: Green/blue light emission and  
chemical feature of nanocrystalline silicon  
embedded in silicon-oxide thin film. In: Appl.  
Phys. A 65, 1997, S.195-198;  
FUJII,Minoru,et.al.: Photoluminescence from SiO<sub>2</sub>

films containing Si nanocrystals and Er: Effects  
of nanocrystalline size on the photoluminescence  
efficiency of Er<sup>3+</sup>. In: Journal Of Applied  
Physics, Vol.84, No.8, 15.Oct.1998, S.4525-4531;  
INOKUMA,T.,et.al.: Optical properties of Si  
clusters and Si nanocrystallites in high-  
temperature annealed SiO<sub>x</sub> films. In: Journal  
Of Applied Physics, Vol.83, No.4, 15.Feb.1998,  
S.2228-2234;  
TSYBESKOV,L.,et.al.: Nanocrystalline-silicon  
superlattice produced by controlled  
recrystallization. In: Appl. Phys. Lett. 72 (1),  
5.Jan.1998, S.43-45;  
INSPEC Abstracts:  
AN 2000:6674843;  
AN 2000:6647662;  
AN 2000:6596447;  
AN 2000:6594030;  
AN 2000:6496282;  
AN 1998:5989007;  
AN 1998:5988878;  
AN 1998:5815642;  
AN 1998:5788430;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

- 54 Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterstruktur mit Siliziumclustern und/oder -nanokristallen und eine Halbleiterstruktur dieser Art
- 57 Beschrieben ist ein Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterstruktur mit Siliziumclustern und/oder -nanokristallen, die in verteilter Form in einer Matrix aus einer Siliziumverbindung vorliegen. Das Verfahren umfaßt die Schritte Abscheiden einer Schicht aus einer thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung mit einer Schichtdicke im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm, speziell zwischen 1 nm und 10 nm und insbesondere zwischen 1 nm und 7 nm auf einem Träger und die thermische Behandlung bei einer Temperatur, die ausreichend ist, um eine Phasenseparation durchzuführen, um die Siliziumcluster oder -nanokristalle in einer Matrix einer thermisch stabilen Siliziumverbindung zu erhalten. Die Ansprüche decken außerdem Halbleiterstrukturen mit solchen verteilten Siliziumclustern oder -nanokristallen ab. Das beschriebene Verfahren ermöglicht eine kostengünstige Herstellung von hochdichten Feldern von Siliziumclustern oder Nanokristallen mit einer engen Größenverteilung.

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterstruktur mit Siliziumclustern und/oder -nanokristallen, die in verteilter Form und einer Matrix aus einer Siliziumverbindung vorliegen, und eine Halbleiterstruktur dieser Art.

[0002] Es ist bekannt, daß in  $\text{SiO}_2$  eingebettete Siliziumcluster oder -nanokristalle eine starke Lumineszenz im sichtbaren Bereich aufweisen.

[0003] Derzeit besteht großes Interesse in der Gestaltung von Halbleiterstrukturen auf Siliziumbasis, die Licht zu emittieren vermögen und die sich für eine Integration in optoelektronischen Schaltungen in Chip-Gestalt, beispielsweise in Form von Lasern und Hochgeschwindigkeits-Telekommunikationsbauelementen, und für einen Einsatz in Speichern eignen.

[0004] Die Ausgabe von Nature vom 23. November 2000, Volume 408, beinhaltet auf den Seiten 411 und 412 einen allgemeinen Artikel von Leigh Canham, der einen allgemeinen Überblick über das Konzept der Lichtgewinnung aus Silizium mit besonderem Hinweis auf Siliziumnanokristalle gibt. Die selbe Ausgabe von Nature enthält außerdem auf den Seiten 440 bis 444 einen Aufsatz von L. Pavesi und Kollegen mit dem Titel "Optischer Gewinn in Siliziumnanokristallen".

[0005] Eine allgemeine Diskussion der Physik der Kristallisation von amorphen Übergittern im Limit ultradünner Schichten mit Oxid-Grenzflächen wird in einem Aufsatz von M. Zacharias und P. Streitenberger in Physical Review B, Volume 62, Nr. 12 vom 15. September 2000 auf den Seiten 8391 bis 8396 gegeben.

[0006] An dieser Stelle sollte erklärt werden, daß Siliziumnanokristalle Siliziumkristalle mit Dimensionen im Nanometer-Bereich sind. Die Nanokristalle enthalten relativ wenige Siliziumatome und weisen Eigenschaften auf, die sich von solchen größerer Siliziumkristalle unterscheiden. Anhäufungen von Siliziumatomen ohne Kristallisation werden manchmal auch als Cluster bezeichnet.

[0007] Bis heute gibt es zwei Hauptvorschläge für die Erzeugung solcher Siliziumcluster oder Nanokristalle. Der erste Vorschlag ist beispielsweise in dem Aufsatz von L. Pavesi et al. beschrieben, beschrieben in der genannten Ausgabe von Nature. Dieser Aufsatz beschreibt, wie Siliziumionen durch negative Ionenimplantationsmethoden in ultrareine Quarzsubstrate oder in thermisch gewachsene Siliziumdioxidschichten auf Siliziumsubstraten implantiert worden sind, gefolgt von thermischem Ausheilen bei hohen Temperaturen, beispielsweise bei  $1100^\circ\text{C}$  für eine Stunde. Diese Wärmebehandlung ermöglicht den implantierten Siliziumatomen sich innerhalb des Substrates zu bewegen und während des thermischen Ausheilens bei hohen Temperaturen Siliziumcluster oder Nanokristalle zu bilden. In dem zitierten Aufsatz von Pavesi et al. steht, daß die in der Siliziumdioxid-Matrix eingebetteten Siliziumnanokristalle einen Durchmesser in der Größenordnung von 3 nm bei einer Konzentration von  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  aufweisen.

[0008] Obwohl Ionenimplantation zur Herstellung von Siliziumnanokristallen eingesetzt werden kann, hat sie den signifikanten Nachteil, daß großflächige Ionenimplantation mit einer hohen Siliziumionen-Dosis üblicherweise nicht in Siliziumelektronik-Produktionssystemen eingesetzt wird und daher die Notwendigkeit der Verwendung von Ionenimplantation eine wesentliche Erschwerung des Herstellungsprozesses bedeutet.

[0009] Ein zweiter Vorschlag zur Herstellung von Siliziumnanokristallen ist in US-A-6,060,743 zu finden. Dieses US-Patent beschreibt eine Vielfalt von Halbleiterstrukturen,

die im Grunde alle die Abscheidung einer dünnen amorphen Siliziumschicht auf einem Siliziumdioxidfilm beinhalten. Die amorphe Siliziumschicht ist beispielsweise nur 1 nm dick. Die dünne Siliziumschicht wird bei einer relativ kleinen Temperatur abgeschieden und wird anschließend bis zu etwa  $800^\circ\text{C}$  erhitzt, ohne der Atmosphäre ausgesetzt zu werden (um Oxidation zu vermeiden). Das Erhitzen verursachte ein Agglomerationsphänomen in der flachen amorphen Siliziumschicht, die auf der Siliziumoxidschicht gebildet wurde. Als Resultat wird die amorphe Siliziumschicht in unabhängige Kristalle mit einem Durchmesser von maximal etwa 10 nm und einer Höhe von etwa 5 nm mit einer Dichte der Siliziumnanokristalle von  $3,5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  umgewandelt. Die Siliziumnanokristalle werden auf der Siliziumdioxidschicht des Siliziumsubstrates gebildet. Danach wird eine weitere Siliziumdioxidschicht über dem Substrat und den Nanokristallen abgeschieden.

[0010] Diese Methode hat den Nachteil, daß nur eine relative kleine Dichte von Nanokristallen erreicht werden kann und daß die Methode wegen des verwendeten Prozesses vernünftig nur auf die Herstellung weniger "Lagen" von Nanokristallen ausgeweitet werden kann.

[0011] Die der Erfindung zugrundeliegende Aufgabe ist, ein Verfahren zur Herstellung von Siliziumclustern und/oder -nanokristallen zu schaffen, welches die Schaffung einer Halbleiterstruktur mit einer hohen Dichte von Clustern und/oder Nanokristallen ermöglicht, wobei die Cluster und/oder Nanokristalle eine enge Größenverteilung aufweisen, d. h. eine gut definierte mittlere Größe und mittleren Abstand, wobei das Verfahren mit bestehender Siliziumtechnologie voll kompatibel ist und kostengünstig in großem Maßstab und auf kompletten Siliziumwafern auszuführen ist.

[0012] Zur Lösung dieser Aufgabe wird gemäß der vorliegenden Erfindung ein Verfahren der eingangs genannten Art geschaffen, das durch die folgenden Schritte gekennzeichnet ist:

- a) Abscheiden einer Schicht einer thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung mit einer Schichtdicke im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm, besonders zwischen 1 nm und 10 nm und insbesondere zwischen 2 nm und 7 nm auf einem Träger und
- b) eine thermische Behandlung bei einer Temperatur, die zur Durchführung einer Phasenseparation ausreichend ist, um in einer Matrix aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung Siliziumcluster oder -nanokristalle zu erhalten.

[0013] Das Verfahren wird am besten anhand eines Beispiels erklärt. Zunächst ist es nötig, ein geeignetes Trägersubstrat zur Verfügung zu haben, welches ein Siliziumwafer mit einer Siliziumdioxidschicht auf einer seiner Oberflächen oder ein Quarzwafer, d. h. ein Wafer aus Siliziumdioxid, oder ein beliebiger anderer thermisch stabiler Träger sein kann, der in der Lage ist, die relativ hohen Temperaturen auszuhalten, die für die thermische Behandlung notwendig sind und die typischerweise in dem Bereich zwischen  $800^\circ\text{C}$  und  $1100^\circ\text{C}$  liegen. Ein weiteres Beispiel für einen solchen Träger ist Saphir. Eine Schicht aus einer thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung, beispielsweise in Form von  $\text{SiO}_x$  mit  $0 < x < 2$ , wird dann als amorphe Schicht auf den Träger abgeschieden, wobei die Dicke der amorphen Schicht so gesteuert wird, daß sie im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm liegt, wobei eine Schichtdicke in einem Bereich von 1 nm bis 10 nm bevorzugt wird, und der Bereich zwischen 1 nm und 7 nm am besten für die Realisation der Erfindung geeignet ist.

[0014] Diese Schicht aus einer thermisch nicht stabilen Si-

lizi-umverbindung wird einer thermischen Behandlung ausgesetzt, beispielsweise indem es bis zu einer Temperatur oberhalb der Kristallisationstemperatur der Schicht der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung erhitzt wird, oder indem die Schicht einem sogenannten schnellen thermischen Ausheilen unterzogen wird, bei dem sie schnell bis zu einer Temperatur um die Kristallisationstemperatur oder sogar darunter erhitzt wird und dann schnell wieder abgekühlt wird, beispielsweise unter Verwendung des AST 10 RTP Systems der Sterg Gruppe. Beide Techniken können zur Erzeugung der Phasenseparation in der Schicht aus der abgeschiedenen thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung verwendet werden. Das soll heißen, daß sich die Sauerstoffatome und die Siliziumatome in der Schicht zu Clustern und Nanokristallen aus reinem Silizium und zu einer Matrix aus stöchiometrischem Siliziumdioxid  $\text{SiO}_2$  umordnen. Die Dicke der abgeschiedenen Schicht definiert die Höhe der sich bildenden Nanokristalle, d. h. sie definiert eine obere Grenze für die Höhe der Siliziumnanokristalle und begrenzt außerdem die lateralen Dimensionen der Nanokristalle. Der Anteil  $x$  des thermisch nicht stabilen  $\text{SiO}_x$  bestimmt die Durchmesser oder Dimensionen der Siliziumnanokristalle und Cluster in einer zur Schichtebene parallelen Richtung und den mittleren Abstand zwischen benachbarten Siliziumclustern oder Nanokristallen. Somit wird die abgeschiedene Schicht aus der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung durch die thermische Behandlung zu in einer Siliziumdioxid-Matrix verteilten Siliziumclustern oder Nanokristallen umgeordnet. Der Prozeß kann leicht gesteuert werden, so daß eine hohe Dichte von Siliziumclustern oder Nanokristallen mit einer engen Größenverteilung erreicht werden, wobei diese Cluster oder Nanokristalle durch relativ gut definierte Mengen an thermisch stabilem Siliziumdioxid von benachbarten Clustern oder Nanokristallen beabstandet sind.

[0015] Da die thermisch nicht stabile Schicht auf beispielsweise Siliziumdioxid abgeschieden wird, weisen die Siliziumnanokristalle keinerlei Tendenz zum Wachstum auf einer reinen Silizium-Oberfläche auf, was sonst die Bildung von diskreten Siliziumclustern oder Nanokristallen mit einheitlicher Größe verhindern würde.

[0016] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ist der Träger zumindest an der Grenzfläche zu der abgeschiedenen Schicht mit einer Schicht aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung oder zumindest aus einer Verbindung einer Seltenen Erde versehen. Die thermisch stabile Verbindung kann beispielsweise Siliziumdioxid oder Siliziumnitrit und die Verbindung einer Seltenen Erde könnte beispielsweise Erbiumoxid sein. Es hat sich herausgestellt, daß die Anwesenheit von Elementen der Seltenen Erden nahe bei oder neben den Siliziumclustern oder Kristallen die leuchtende Emission der Elemente der Seltenen Erden verstärkt und insbesondere zu einer verstärkten Strahlung mit einer Wellenlänge von  $1,54 \mu\text{m}$  (für Erbium) führt, was eine bevorzugte Wellenlänge für optoelektronische Anwendungen ist.

[0017] Obwohl es denkbar ist, daß eine einzige dünne Schicht, die verteilte Siliziumcluster und/oder -nanokristalle enthält, auf einem Träger für einige Anwendungen ausreichend sein mag, wird es als vorteilhaft erachtet, zur Erzeugung der Cluster und Nanokristalle vor der thermischen Behandlung eine weitere Schicht aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung oder aus zumindest einer Verbindung einer Seltenen Erde auf die Schicht aus der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung abzuscheiden. Dies führt zu einem hochdichten Feld von Siliziumclustern oder Nanokristallen in einer einzigen Ebene mit einer Dichte von typischerweise  $1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ .

[0018] Insbesondere ist es möglich, eine abwechselnde Folge von abgeschiedenen Schichten aus thermisch nicht stabilen und thermisch stabilen Siliziumverbindungen mit der Möglichkeit weiterer Zwischenschichten vorzusehen.

Bei Verwendung der Erfindung kann zunächst die gesamte Schichtstruktur gebildet und erst dann der thermischen Behandlung ausgesetzt werden, die nötig ist, um die thermisch nicht stabile Siliziumverbindung in Siliziumcluster und/oder -nanokristalle in einer Siliziumdioxid-Matrix umzuwandeln.

[0019] Auf diese Weise kann eine dreidimensionale Anordnung von Siliziumclustern oder Mikrokristallen mit einer Dichte von beispielsweise  $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  in jeder relevanten Schicht erreicht werden.

[0020] In einer solchen alternierenden Folge von abgeschiedenen Schichten sollten alle Schichten aus der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung dieselbe Dicke im o. g. Bereich aufweisen, um sicherzustellen, daß die Siliziumcluster und/oder Nanokristalle in der richtigen Größe erzeugt werden. Die Trennschichten aus der thermisch stabilen Siliziumverbindung können jedoch deutlich dicker sein.

[0021] Es ist auch möglich, die abwechselnden Schichten aus der thermisch stabilen Siliziumverbindung mit einer Größe in einem Nanometerbereich zu realisieren, so daß die alternierende Folge als Übergitter ausgeführt wird.

[0022] Die alternierende Schichtsequenz kann in zumindest einem räumlich begrenzten Bereich einer Struktur, beispielsweise einer photonischen oder optischen Struktur, gebildet werden.

[0023] Es besteht auch die Möglichkeit, dann das Material, das den räumlich begrenzten Bereich umgibt, durch beispielsweise Ätzen zu entfernen, um eine freistehende Schichtsequenz zu bilden, die zur Einbindung in eine optoelektronische Schaltung an der freien oberen Oberfläche kontaktiert werden kann, wobei der andere Kontakt an die freistehende Schichtsequenz beispielsweise am Träger oder am Substrat realisiert wird.

[0024] In solchen Schichtsequenzen können beispielsweise durch Implantation oder während des Schichtwachstums eine oder mehrere der Siliziumverbindungsschichten mit zumindest einem Element einer Verbindung aus der Gruppe der Seltenen Erdelemente dotiert werden.

[0025] Die mittlere Größe und der mittlere Abstand der Cluster oder der Nanokristalle kann durch die Stöchiometrie der thermisch nicht stabilen Verbindung, d. h. durch den für  $x$  gewählten Wert, eingestellt werden. Außerdem können die mittlere Größe und der mittlere Abstand der Cluster oder der Nanokristalle durch die für die thermische Behandlung charakteristische Temperatur und auch durch die verwendeten Umgebungsbedingungen eingestellt werden, beispielsweise die Gase, die in der Behandlungskammer eingesetzt werden, die zum Beispiel Formiergas, Sauerstoff oder Argon sein können. Alternativ können in der thermischen Behandlungskammer auch Vakuumbedingungen eingesetzt werden, die ebenfalls die durchschnittliche Größe und den durchschnittlichen Abstand der Cluster und/oder Nanokristalle beeinflussen.

[0026] Weitere bevorzugte Ausführungsformen des Verfahrens sowie bevorzugte Ausführungsformen von Halbleiterstrukturen, die mittels dieses Verfahrens gebildet werden, ergeben sich aus den Unteransprüchen.

[0027] Während die Ansprüche 18 bis 30 solche Halbleiterstrukturen betreffen, in denen die Schichten aus thermisch nicht stabilen Halbleiterverbindungen zu in einer Siliziumdioxid-Matrix verteilten Siliziumclustern und/oder -nanokristallen umgewandelt worden sind, betreffen die Ansprüche 31 bis 35 die Halbleiterstruktur vor der thermischen Behandlung, in der die Siliziumcluster oder Nanokristalle

erzeugt werden, da solche Halbleiterstrukturen Zwischenprodukte bilden können, die genauso eigenständig behandelt werden können wie Halbleiterwafer als Zwischenprodukte für die nachfolgende Herstellung von elektronischen Bauelementen und Schaltungen.

[0028] Die Erfindung wird nun unter Bezugnahme auf bevorzugte Ausführungsformen und die Zeichnungen genauer erklärt. Es zeigen:

[0029] Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Illustration der Bildung von Siliziumclustern oder Nanokristallen unter Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens,

[0030] Fig. 2 eine schematische Darstellung, die ein einlagiges Feld von auf einem Träger gebildeten Siliziumclustern oder Nanokristallen zeigt,

[0031] Fig. 3 eine schematische Darstellung, ähnlich wie in Fig. 2, die jedoch eine alternative Trägerart zeigt,

[0032] Fig. 4 eine schematische Darstellung ähnlich wie in Fig. 3, die jedoch ein einlagiges Feld von Siliziumclustern oder Nanokristallen zeigt, die durch eine Deckschicht aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung bedeckt sind,

[0033] Fig. 5 eine schematische Darstellung, die eine Weiterentwicklung des Konzepts aus Fig. 4 zur Herstellung mehrlagiger Felder von Siliziumclustern oder Nanokristallen zeigt,

[0034] Fig. 6 eine schematische Darstellung, die eine Modifikation des Mehrschichtsystems aus Fig. 5 zur Bildung einer Übergitterstruktur zeigt, in der Siliziumcluster und Nanokristalle in abwechselnden Schichten eingebaut sind,

[0035] Fig. 7 eine perspektivische Ansicht eines Wafers mit einem Feld von Aussparungen,

[0036] Fig. 8 eine schematische Querschnittsansicht auf die Ebene VIII-VIII in Fig. 7 bei vergrößertem Maßstab, die Übergitterstrukturen ähnlich denen in Fig. 6 zeigt, die in jeder der Aussparungen des Wafers in Fig. 7 gebildet sind,

[0037] Fig. 9 eine schematische Darstellung, die die Übergitterstruktur in Fig. 7 zeigt, die in eine sogenannte MOS-Struktur eingebaut ist, und

[0038] Fig. 10 eine schematische Darstellung eines bekannten lichtemittierenden Halbleiterbauelementes, welches zur Verwendung einer erfindungsgemäßen Übergitterstruktur im optisch aktiven Bereich angepaßt wurde.

[0039] In Fig. 1 ist eine schematische Seitenansicht einer einzelnen Schicht 10 einer Schicht aus einer thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung gezeigt, hier in Form von  $\text{SiO}_x$ , wobei der Wert  $x$  als ein nicht stöchiometrischer Wert größer als 0 aber kleiner als 2 gewählt ist. Die Schicht 10 kann eine Schichtdicke im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm haben, bevorzugt ist sie aber 2 bis 3 nm dick. Die Schicht 10 kann durch jeden der bekannten Schichtabscheidungsprozesse abgeschieden werden, wie beispielsweise in einer Gasphasenabscheidung, Tiefdruckgasphasenabscheidung, Verdampfung von  $\text{SiO}_x$  in sauerstoffhaltigen Atmosphären, Sputtern, reaktives Sputtern, gepulste Laserabscheidung und Molekularstrahlepitaxie.

[0040] Obwohl die thermisch nicht stabile Siliziumverbindung in allen vorliegenden Beispielen  $\text{SiO}_x$  ist, ist auch die Verwendung anderer thermischer, nicht stabiler Siliziumverbindungen gut vorstellbar, wobei eine Möglichkeit ein Siliziumnitrid wäre, welches dann in Form von  $\text{SiN}_x$  abgeschieden würde.

[0041] Ist die Schicht 10 abgeschieden, wird sie danach einer thermischen Behandlung unterzogen, wobei dies in einer Phasenseparation des amorphen  $\text{SiO}_x$  in Siliziumcluster oder -nanokristalle 11 resultiert, die durch eine  $\text{SiO}_2$ -Matrix 13 getrennt werden, wie es schematisch in der unteren Variante der Schicht 10 in Fig. 1 gezeigt ist, wobei der vertikal nach unten gerichtete Pfeil die Wärmebehandlung repräsentiert.

tiert. Diese Wärmebehandlung kann entweder eine Wärmebehandlung über eine geeignete Zeitdauer bei einer Temperatur bei oder oberhalb der Kristallisationstemperatur  $T_c$  sein, beispielsweise eine Wärmebehandlung bei 1100°C für 60 Minuten. Es sollte bemerkt werden, daß  $T_c$  kein tatsächlich fester Wert ist, sondern bei dünnen Schichten von der genauen Schichtstruktur der verwendeten Schicht abhängt, da die Kristallisationstemperatur stark von Spannungserwägungen abhängt und diese durch die Schichtgröße beeinflusst sind. Somit kann die Kristallisationstemperatur abhängig von der betroffenen genauen Schichtstruktur über einen weiten Bereich variieren, angefangen von der Kristallisationstemperatur von amorphem Bulkmaterial von 700°C bis hin zu Temperaturen von 1100°C oder mehr.

[0042] Es sollte außerdem erwähnt werden, daß die Maximalhöhe der Siliziumcluster oder Nanokristalle durch die Schichtdicke begrenzt ist. Es ist jedoch möglich, daß sich, wie in Fig. 1 bei 11 gezeigt, Siliziumcluster oder Nanokristalle bilden, die kleiner als die Schichtdicke sind. Die Stöchiometrie, d. h. der Wert  $x$  in  $\text{SiO}_x$  kann diese Tendenz beeinflussen. Wenn  $x$  relativ hoch ist, ist auch die Tendenz zur Bildung kleinerer Cluster oder Kristalle wie 11' größer.

[0043] Eine Alternative zur thermischen Behandlung bei einer im wesentlichen konstanten Temperatur für eine feste Zeitdauer besteht darin, die Schicht oder Schichtstruktur einem schnellen thermischen Ausheilen auszusetzen, so daß die betreffende Schicht oder Schichtstruktur ein oder mehrmals schnell bis zu einer Spitztemperatur erhitzt und schnell wieder abgekühlt wird, wobei die Spitztemperatur in der Regel im oben genannten Bereich (700°C bis 1100°C) oder sogar signifikant niedriger, unter der Kristallisationstemperatur  $T_c$  der Struktur liegt.

[0044] Unabhängig von der verwendeten thermischen Behandlung bestimmt die Dicke der Schicht 10 sowohl die Höhe als auch die lateralen Dimensionen der Nanokristalle, wobei sie außerdem die Größenverteilung der Cluster oder Nanokristalle derart steuert, daß die Größenverteilung sehr eng ist. Die erzeugten Siliziumcluster oder Nanokristalle sind daher gut definiert und sind durch ein hochqualitatives Oxid getrennt, welches sogar bis zu zwei Monolagen dick sein kann. Im Allgemeinen wird der Abstand zwischen den Oberflächen benachbarter Cluster und Siliziumnanokristalle so gewählt, daß er im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm liegt.

[0045] Auf diese Weise weist die Schicht 10 ein dichtes in einer Ebene gelegenes Feld von Siliziumclustern oder -nanokristallen mit einer engen Größenverteilung auf. Dies begünstigt eine sehr intensive definierte Leuchtemission aus der Schicht, wenn sie mit Energie aus einer äußeren Quelle, entweder in Form von optischem Pumpen oder durch Ladungsträgerinjektion, versehen wird.

[0046] In einer brauchbaren Ausführungsform muß die Schicht in Fig. 1 wie in Fig. 2 gezeigt auf einem Träger 12 gebildet werden. In Fig. 2 ist der Träger 12 aus Quarz gebildet und die Schicht 10 liegt entsprechend der unteren Darstellung in Fig. 1 in thermisch behandelter Form vor. Diese Schicht wird hier als nc Si in  $\text{SiO}_2$  bezeichnet (nc = Nanokristall). Quarz besteht chemisch aus  $\text{SiO}_2$ , was eine chemisch und thermisch stabile Siliziumverbindung ist. Daher besteht keine Gefahr, daß die Siliziumnanokristalle mit der Oberfläche des Trägers verschmelzen. Stattdessen verbleiben sie in diskreter Form in der Schicht 10. Anstelle einer Verwendung von Quarz für den Träger 12 kann dieser auch ein Substrat aus einem anderen thermisch stabilen Material sein, wie beispielsweise einem Saphirwafer. Alternativ kann der Träger 12, wie in Fig. 3 gezeigt, ein Siliziumsubstrat 14 mit einer aufgewachsenen  $\text{SiO}_2$ -Schicht 16 aufweisen, beispielsweise einer thermisch gewachsenen Siliziumdioxid-

schicht, die man erhält, indem das Siliziumsubstrat in einer sauerstoffhaltigen Umgebung einer hohen Temperatur ausgesetzt wird. Die Schicht 10 wird dann auf der  $\text{SiO}_2$ -Schicht abgeschieden und die resultierende Halbleiterstruktur zur Erzeugung der Siliziumnanokristalle in  $\text{SiO}_2$  in dieser 3 nm dicken Schicht 10 thermisch behandelt. Es sei bemerkt, daß die direkt unter der Schicht 10 gelegene  $\text{SiO}_2$ -Schicht 16 außerdem bedeutet, daß die Nanokristalle in der Schicht durch das  $\text{SiO}_2$  von dem Siliziumsubstrat getrennt sind.

[0047] Wie in Fig. 4 gezeigt, kann die Halbleiterstruktur in Fig. 3 durch die Abscheidung einer weiteren  $\text{SiO}_2$ -Schicht 18 weiterentwickelt werden. Die Schicht 18 ist bevorzugt  $\text{SiO}_2$ . Sie könnte jedoch beispielsweise ebenso  $\text{Si}_3\text{N}_4$  sein, wobei dies genauso für die Schicht 16 gilt.

[0048] Die Erfindung ist jedoch besonders einfach zu realisieren, wenn die Schichten 16 und 18  $\text{SiO}_2$  sind und die Schicht 10 als  $\text{SiO}_x$  abgeschieden ist. Wenn dies der Fall ist, ist es möglich, die Schichtzusammensetzung allein durch die Variation des Sauerstoffdrucks in der Abscheidungskammer zu steuern. Ist der Sauerstoffdruck relativ hoch eingestellt, so ist eine ausreichende Anzahl von Sauerstoffatomen zur Abscheidung eines thermisch stabilen  $\text{SiO}_2$  vorhanden. Ist andererseits der Sauerstoffdruck erniedrigt, so wird eine  $\text{SiO}_x$ -Schicht abgeschieden, da nicht genügend Sauerstoffatome zur Bildung von  $\text{SiO}_2$  zur Verfügung stehen. Somit kann ein Sandwich-System, wie die Schichten 16, 10 und 18 in Fig. 4, einfach durch die Variation des Sauerstoffdrucks in der Abscheidvorrichtung abgeschieden werden.

[0049] Dies gilt auch für die Fig. 5 gezeigte Mehrschichtstruktur. Die in Fig. 5 gezeigte Struktur unterscheidet sich von der in Fig. 4 gezeigten Struktur nur durch die Tatsache, daß die Schichten 10 und die Schichten 18 in abwechselnder Reihenfolge vorkommen, wobei die  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -Schichten 18 wesentlich dicker als die entsprechenden Schichten in Fig. 4 sind. Jede einzelne Schicht 10 wird als 3 nm dicke Schicht mit Siliziumnanokristallen in  $\text{SiO}_2$  realisiert, weshalb in der erzeugten Halbleiterstruktur ein wohlgeordnetes Feld von Siliziumclustern oder Nanokristallen vorkommt. Obwohl die Ausführungsform in Fig. 5 nur zwei Schichten 10 zeigt, kann die Struktur je nach Wunsch mit viel mehr Schichten 10 und 18 wiederholt werden. Dies gilt auch für die in Fig. 6 gezeigte Struktur, bei der in abwechselnder Reihenfolge 25 alternierende Schichten 10 und 18 auf einem Träger 12 abgeschieden sind, der hier als Quarzträger gezeigt ist. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind die Schichten 10 wieder in Form einer 3 nm dicken Schicht mit in einer  $\text{SiO}_2$ -Matrix verteilten Siliziumnanokristallen realisiert. Die Schichten 18 sind bevorzugt aus  $\text{SiO}_2$  gebildet.

[0050] Es ist jedoch nicht wesentlich, daß der Träger 12 ein Quarzsubstrat ist. Er könnte beispielsweise auch ein Saphirsubstrat oder ein Siliziumsubstrat sein. In diesem Fall sollte eine  $\text{SiO}_2$ -Schicht 16 unterhalb der untersten Schicht 10 der Übergitterstruktur auf dem Siliziumsubstrat abgeschieden werden. Zur Erzeugung der Übergitterstruktur sollten die Schichten 18 relativ dünn, im Nanometerbereich, d. h. dünner als die schematisch in Fig. 5 gezeigten Schichten, gehalten werden. Die Übergitterstruktur hat den Vorteil, daß die einzelnen Schichten 10 der Struktur relativ nahe beieinander angeordnet sind, so daß eine hohe Dichte von Siliziumclustern oder -nanokristallen erreicht wird und die Kristalle tatsächlich in wohlgeordneten Schichten 10 angeordnet sind. Die Übergitterstruktur kann wieder durch die Variation des Sauerstoffdrucks in dem Abscheidensystem hergestellt werden.

[0051] Fig. 7 und 8 zeigen ein interessantes Konzept zur Herstellung einer wie in Fig. 6 gezeigten Supergitterstruktur in einer photonischen, optischen oder elektronischen Struk-

tur.

[0052] Fig. 7 zeigt schematisch einen Chip oder Wafer mit einem Träger 12 aus Quarz, auf dem zunächst eine relativ dicke Schicht 20 aus Siliziumdioxid gewachsen wurde. Die Siliziumdioxidschicht wird dann so geätzt, daß sich mehrere Ausnehmungen oder räumlich begrenzte Bereiche 22 bilden, die in Fig. 7 als runde Löcher gezeigt sind, die aber ebenso quadratische Löcher oder Bereiche mit anderer Gestalt, beispielsweise kanalförmige Ausnehmungen sein können. Die Übergitterstruktur wird dann in den räumlich begrenzten Bereichen 22 auf das Quarzsubstrat abgeschieden, was in einer fertigen Struktur resultiert, wie sie schematisch in Fig. 8 gezeigt ist. Wieder haben die in Fig. 8 verwendeten Bezugszeichen die gleiche Bedeutung wie in den früheren Zeichnungen. D. h.: die Schichten 10 bestehen in einer bevorzugten Ausführungsform aus einer 3 nm dicken Schicht von nanokristallinem Silizium in  $\text{SiO}_2$  und die Schichten 18 aus  $\text{SiO}_2$ -Schichten. Statt Quarz als Träger zu verwenden, ist es auch möglich, einen Saphirträger oder ein Siliziumsubstrat zu verwenden, wobei in diesem Fall zur Herstellung des Trägers zunächst eine Siliziumdioxidschicht auf das Siliziumsubstrat gewachsen wird, so daß die Unterschicht einer jeden Übergitterstruktur nun keine Schicht 10 sondern eine der Schicht 16 in Fig. 4 entsprechende  $\text{SiO}_2$ -Schicht ist.

[0053] Alternativ kann man anstelle eines Quarzträgers und anstelle einer  $\text{SiO}_2$ -Schicht 20 einen Bulk-Siliziumwafer verwenden, in dem durch beispielsweise Ätzen Löcher oder Kanäle oder Ausnehmungen erzeugt werden.

[0054] Eine Struktur wie sie in Fig. 8 gezeigt ist, kann für ein optisch gepumptes Siliziumbauelement verwendet werden, das Lumineszenz bei einer Wellenlänge zeigt, die bestimmt wird durch die Größe der Nanokristalle in der Siliziumdioxid-Matrix und/oder durch die Siliziumnanokristall/ $\text{SiO}_2$ -Grenzflächenzustände und/oder durch Zustände, die durch ein Element der Seltenen Erden oder eine Verbindung, die als Dotierstoff in der Struktur verwendet wird, bestimmt werden. Es ist nämlich möglich, in allen hier beschriebenen Strukturen zumindest ein Element der Seltenen Erden oder zumindest eine Verbindung mit einem Element der Seltenen Erden als Dotierstoff zu verwenden. Beispielsweise kann der Dotierstoff Erbium oder Erbiumoxid aufweisen, was zu einer Lumineszenz bei einer Wellenlänge von 1,54  $\mu\text{m}$  führt. Zur Erzeugung dieser Lumineszenz ist es nötig, die Struktur entweder optisch oder elektronisch zu pumpen. Im optischen Fall würde dies mit Strahlung geschehen, beispielsweise Breitbandstrahlung, bei einer höheren Frequenz (kleinerer Wellenlänge) als sie durch die Siliziumnanokristalle erzeugt wird, und die strahlende Transmission mit einer Wellenlänge von 1,54  $\mu\text{m}$  stimuliert.

[0055] Die Dotierung kann unterschiedliche Formen annehmen. Beispielsweise kann die Dotierung kleine Mengen eines über das Schichtsystem verteilten Dotiermaterials aufweisen. Alternativ können dünne Schichten eines Dotierstoffs neben den Schichten 10 abgeschieden werden, so daß ein Dotierstoff in der Nähe der Nanokristalle vorhanden ist. Außerdem kann eine Volumendotierung in den Schichten 10 verwendet werden, so daß sich wieder Dotierstoffe in großer Nähe zu den Siliziumnanokristallen befinden.

[0056] Die Struktur in Fig. 8 kann auch weiterentwickelt werden. Eine Möglichkeit wäre dabei, die Struktur in Fig. 8 mit einer Maske zu versehen, welche die Übergitterstrukturen bedeckt, gleichzeitig aber das  $\text{SiO}_2$ -Material in der Schicht 20, welches die Übergitterstrukturen umgibt, freiläßt. Sobald die Maske aufgebracht ist, könnten die  $\text{SiO}_2$ -Bereiche selektiv weggeätzt werden, so daß freistehende Übergittersäulen auf dem Substrat stehenbleiben. Es ist dann denkbar, daß Kontakte oben auf den freistehenden Übergittersäulen und an dem Substrat 12 angebracht werden

(sofern dieses als leitendes Silizium, beispielsweise n-Typ-Silizium ausgebildet ist), so daß es möglich ist, der Übergitterstruktur Ladungsträger zuzuführen und Lumineszenz durch eine elektrische Methode zu erzeugen.

[0057] Eine auf diese Weise gebildete Struktur könnte 5 hinterher in einzelne Bauelemente aufgeteilt werden, wobei jedes eine freistehende Übergittersäule aufweisen würde. Die Säulen könnten allerdings auch als längliche Streifen oder Stege ausgebildet sein.

[0058] Fig. 9 zeigt eine Möglichkeit zum Einbau einer 10 Übergitterstruktur, die ähnlich der in Fig. 6 gezeigten ist, in eine sogenannte MOS-Struktur. Hier ist der Träger 12 als ein hochdotiertes Siliziumsubstrat ausgebildet (kristallines n-Typ-Siliziumsubstrat), auf das die Übergitterstruktur gewachsen wird, mit einer Schicht 16 aus  $\text{SiO}_2$  an der Grenzfläche zwischen dem Träger 12 und der untersten Schicht 10 der Übergitterstruktur. Die Schichten 12, 16, 10 und 18 sind wieder entsprechend der Beschreibung zu verstehen, die bereits für die Schichten gegeben worden ist, die mit den selben Bezugszeichen versehen sind. Nach dem Hochtemperatur-Ausheilen wird oben auf die Übergitterstruktur eine lichttransmittierende Kontaktschicht abgeschieden, beispielsweise aus ITO (Indiumzinnoxid ( $\text{InSnO}$ )) oder aus einer transparenten metallischen Schicht wie beispielsweise Gold. Anschlußdrähte wie 24 und 26 können dann an die Kontaktschichten auf dem Substrat und auf der Oberschicht 23 angebracht werden. 25

[0059] Obwohl die Übersicht der in Fig. 9 gezeigten Übergitterstruktur mit den Bezugszeichen 18 versehen ist, kann die Oberschicht unter der Kontaktschicht auch eine Schicht 10 sein. Weiterhin ist die Periodenanzahl der in Fig. 9 gezeigten Übergitterschicht rein beispielhaft gewählt. Wie in anderen Ausführungsformen, die Übergitterstrukturen beinhalten, kann die Anzahl der tatsächlich vorkommenden Schichten beliebig variiert werden. 30 35

[0060] Fig. 10 schließlich zeigt eine schematische Darstellung eines lichtemittierenden Bauelementes in einer grundsätzlich bekannten Anordnung, die in diesem Fall aber für die Verwendung einer erfindungsgemäßen Übergitterstruktur angepaßt wurde. 40

[0061] Genauer gesagt zeigt die Darstellung in Fig. 10 eine Struktur mit den folgenden Schichten, beginnend mit der untersten. 28 ist eine Kontaktschicht, die auf der Unterseite eines n-Typ-Siliziumträgers 12 angebracht ist, auf dem eine Übergitterstruktur, hier als SL (10, 18) bezeichnet, abgeschieden ist, wobei zwischen der n-Si-Schicht und der Übergitterstruktur 10, 18 wieder eine Zwischenschicht 16 aus  $\text{SiO}_2$  vorgesehen ist. Die Übergitterstruktur wird dann von einer Schicht 30 aus p-Typ-Silizium gefolgt, die sich im zentralen Bereich nach oben erstreckt, um so einen Steg oder Streifen 32 aus dem gleichen Material zu bilden. Ein Isolator 34, beispielsweise  $\text{SiO}_2$ , wird dann auf jeder Seite des Steges 32 über die Schicht 30 aus p-Typ-Silizium abgeschieden. Die Struktur wird dann mit einer oberen Kontaktschicht 36 bedeckt. Durch das Anlegen eines Potentialunterschiedes zwischen den Schichten 28 und 36 ist es dann möglich, der Übergitterstruktur 10, 18 Ladungsträger zuzuführen und dort Lumineszenz zu erzeugen, so daß Licht, wie durch die Pfeile 38 angedeutet, die Übergitterstruktur in einen Bereich unterhalb des Steges 32 verlassen kann. 50 55 60

[0062] Wird  $\text{SiO}_x$  als die thermisch nicht stabile Siliziumverbindung und  $\text{SiO}_2$  als die thermisch stabile Siliziumverbindung bei der Herstellung verwandt, so können die Dicke der  $\text{SiO}_x$  und  $\text{SiO}_2$ -Schichten, ihre Anzahl, die Zusammensetzung der  $\text{SiO}_x$ -Schichten (x zwischen 0 und 2) und der Prozeß der thermischen Behandlung (Prozeßdauer, Temperatur, Temperaturprofil und die während der thermischen Behandlung verwendeten Gase oder das während der ther-

mischen Behandlung verwendete Vakuum) variiert werden, um zu steuern:

- Die Größe der erzeugten Siliziumcluster oder -nanokristalle,
- die Größenverteilung der Teilchen,
- die Dichte der Cluster oder Nanokristalle in jeder Schicht, die Cluster und Nanokristalle enthält,
- und die Dicke der Oxidbarrieren zwischen den Siliziumclustern oder Nanokristallen.

[0063] Von Strukturen, wie sie hier beschrieben sind, ist ein optischer Gewinn zu erwarten. Sie sind für eine Verwendung in lichtemittierenden Anwendungen geeignet. Darüber hinaus können die beschriebenen Halbleiterstrukturen in photonischen oder elektronischen Strukturen integriert werden und insbesondere mit anderen elektronischen Schaltungen auf Chips integriert werden.

[0064] Die Strukturen können entweder während der Abscheidung oder später durch Ionenimplantation mit optisch aktiven Atomen, insbesondere mit Elementen der Seltenen Erden, dotiert werden.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung einer Halbleiterstruktur mit Siliziumclustern und/oder -nanokristallen, die in verteilter Form in einer Matrix aus einer Siliziumverbindung vorliegen, **gekennzeichnet durch** die Schritte

a) Abscheiden einer Schicht aus einer thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung mit einer Schichtdicke im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm, besonders zwischen 1 nm und 10 nm, und insbesondere zwischen 1 nm und 7 nm auf einem Träger und

b) thermische Behandlung bei einer Temperatur, die ausreichend ist, um eine Phasenseparation durchzuführen, um die Siliziumcluster oder -nanokristalle in einer Matrix aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung zu erhalten.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die thermische Behandlung ein Erhitzen der abgeschiedenen Schicht oder der Halbleiterstruktur bis zu einer Temperatur bei oder über der Kristallisationstemperatur ( $T_c$ ) umfaßt.

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die thermische Behandlung schnelles thermisches Ausheilen aufweist, d. h. ein ein- oder mehrmaliges schnelles Erhitzen mit nachfolgendem Abkühlen nach jeder Heißphase.

4. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Träger mit, zumindest an der Grenzfläche zu der abgeschiedenen Schicht, einer Schicht aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung oder aus einer Verbindung zumindest einer Seltenen Erde versehen wird.

5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Schicht aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung oder aus einer Verbindung zumindest einer Seltenen Erde auf die Schicht aus der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung abgeschieden wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß in abwechselnder Reihenfolge abgeschiedene Schichten aus thermisch nicht stabilen und thermisch stabilen Siliziumverbindungen, optional mit weiteren Zwischenschichten, hergestellt werden.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet,



net, daß die abwechselnde Reihenfolge als ein Übergitter ausgeführt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtsequenz in zumindest einem räumlich begrenzten Bereich einer Struktur, beispielsweise einer photonischen oder optischen Struktur, gebildet wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß das Material der den Bereich umgebenden Struktur hinterher durch beispielsweise ätzen entfernt wird, um eine freistehende Schichtsequenz zu erzeugen.

10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Halbleiterstruktur insbesondere in der Nähe der Cluster oder Nanokristalle zumindest ein Element oder eine Verbindung aus der Gruppe der Elemente der Seltenen Erden, beispielsweise Erbium oder Erbiumoxid, aufweist.

11. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine oder mehrere Siliziumverbindungsschichten beispielsweise durch Implantation oder während der Erzeugung einer der Schichten zumindest mit einem Element oder einer Verbindung aus der Gruppe der Elemente der Seltenen Erden dotiert ist.

12. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die mittlere Größe und der mittlere Abstand zwischen den Clustern oder den Nanokristallen durch die Stöchiometrie der thermisch nicht stabilen Verbindung eingestellt werden, d. h. durch einen  $x$ -Wert mit  $0 < x < 2$ , sofern die thermisch nicht stabile Verbindung  $\text{SiO}_x$  ist.

13. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die mittlere Größe und der mittlere Abstand zwischen den Clustern oder den Nanokristallen durch die für die thermische Behandlung charakteristische Temperatur und auch durch die verwendeten Umgebungsbedingungen, beispielsweise die verwendeten Gase, zum Beispiel Formiergas/Stickstoff/Argon, oder die Vakuumbedingungen, eingestellt werden.

14. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die erzeugte Struktur in eine elektronische Struktur integriert ist, die geeignet ist, den Clustern oder Nanokristallen Ladungsträger zuzuführen oder in die Cluster oder Nanokristalle Ladungsträger zu injizieren.

15. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Abscheidung der Schicht oder Schichten auf den Träger mit einer der Methoden aus der Gruppe durchgeführt wird, die umfaßt: Gasphasenabscheidung, Tiefdruck-Gasphasenabscheidung, Verdampfung von  $\text{SiO}_x$ -Pulvern in sauerstoffhaltigen Atmosphären, Sputtern, reaktives Sputtern, gepulste Laserabscheidung und Molecularstrahl epitaxie.

16. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß  $\text{SiO}_x$  mit  $0 < x < 2$  als die thermisch nicht stabile Siliziumverbindung gewählt wird.

17. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß  $\text{SiO}_2$  oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$  als die thermisch stabile Siliziumverbindung gewählt wird.

18. Halbleiterstruktur mit Siliziumclustern und/oder -nanokristallen, die in verteilter Form in einer Matrix einer Siliziumverbindung vorliegen, dadurch gekennzeichnet, daß die Siliziumcluster und/oder -nanokristalle eine Höhe im Bereich zwischen 0,5 nm und

20 nm, speziell zwischen 1 nm und 10 nm und insbesondere zwischen 1 nm und 7 nm und laterale Dimensionen im gleichen Bereich aufweisen und durch ein Matrixmaterial aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung voneinander getrennt sind, wobei der mittlere Abstand (Oberfläche zu Oberfläche) zwischen benachbarten Clustern und/oder Nanokristallen im Bereich zwischen 0,5 nm und 100 nm liegt, und daß die Matrix aus der thermisch stabilen Siliziumverbindung, die die Siliziumcluster und/oder -nanokristalle aufweist, auf einem Träger vorgesehen ist und eine Dicke im Bereich von 0,5 nm bis 20 nm aufweist, wobei die Cluster oder Nanokristalle im wesentlichen koplanar sind.

19. Halbleiterstruktur nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger zumindest an der Grenzfläche zu der abgeschiedenen Schicht eine thermisch stabile Siliziumverbindung oder eine Verbindung zumindest einer Seltenen Erde aufweist.

20. Halbleiterstruktur nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger ein Substrat aus Quarz oder einem anderen thermisch stabilen Isolationsmaterial aufweist, welches eine thermische Behandlung bei Temperaturen in der Größenordnung von 700°C oder höher aushält.

21. Halbleiterstruktur nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, daß der Träger ein Siliziumsubstrat oder ein Saphirsubstrat aufweist, wobei sich die thermisch stabile Siliziumverbindung oder die Verbindung zumindest einer Seltenen Erde an der Grenzfläche zu der Schicht befindet, welche die Siliziumcluster und/oder -nanokristalle enthält.

22. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 18 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß eine weitere Schicht aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung oder einer Verbindung zumindest einer Seltenen Erde auf der dem Träger abgewandten Seite der Schicht vorliegt, die die Siliziumcluster und/oder -nanokristalle enthält.

23. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 18 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß es eine abwechselnde Reihe von abgeschiedenen Schichten einer thermisch stabilen Siliziumverbindung und Schichten gibt, die eine Matrix aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung aufweisen, in der Siliziumcluster und/oder -nanokristalle in verteilter Form vorliegen.

24. Halbleiterstruktur nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß die abwechselnde Reihe weitere Zwischenschichten aufweist.

25. Halbleiterstruktur nach Anspruch 23 oder 24, dadurch gekennzeichnet, daß die abwechselnde Reihe als Übergitterstruktur ausgeführt ist.

26. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 23, 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die abwechselnde Reihe in zumindest einem räumlich begrenzten Bereich einer Struktur, beispielsweise einer photonischen oder einer optischen Struktur, gebildet ist.

27. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 23, 24 oder 25, dadurch gekennzeichnet, daß die abwechselnde Reihe als eine freistehende Schichtsequenz auf dem Träger vorliegt.

28. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 18 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß sie zumindest ein Element oder eine Verbindung aus der Gruppe der Elemente der Seltenen Erden, beispielsweise Erbium oder Erbiumoxid, aufweist.

29. Halbleiterstruktur nach einem der vorherigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Element

oder die Verbindung der Seltenen Erden in den Schichten aus thermisch stabiler Siliziumverbindung und/oder in den Schichten aus thermisch stabiler Siliziumverbindung vorliegt, die in verteilter Form die Siliziumcluster und/oder -nanokristalle aufweisen. 5

30. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 18 bis 29, dadurch gekennzeichnet, daß sie zur Versorgung der Cluster oder Nanokristalle mit Ladungsträgern oder zur Injektion von Ladungsträgern in die Cluster oder Nanokristalle in eine elektronische Struktur 10 integriert ist.

31. Halbleiterstruktur mit zumindest einer Schicht aus einer thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung mit einer Schichtdicke im Bereich zwischen 0,5 nm und 20 nm auf einem Träger, welcher Temperaturen von 15 mindestens 700°C aushält, wobei zumindest eine Grenzfläche zwischen dem Träger und der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindungsschicht eine thermisch stabile Siliziumverbindung oder eine Verbindung zumindest einer Seltenen Erde aufweist. 20

32. Halbleiterstruktur nach Anspruch 31, wobei mehrere Schichten aus der thermisch nicht stabilen Siliziumverbindung auf dem Träger vorgesehen und entsprechend durch Schichten aus einer thermisch stabilen Siliziumverbindung voneinander getrennt sind. 25

33. Halbleiterstruktur nach einem der Ansprüche 18 bis 31, wobei die Matrix ein Siliziumdioxid aufweist.

34. Halbleiterstruktur nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Schicht oder Schichten aus thermisch stabiler Siliziumverbindung, Siliziumdioxid 30 oder Siliziumnitrit aufweisen.

35. Halbleiterstruktur nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die thermisch nicht stabile Siliziumverbindung  $\text{SiO}_x$  mit  $0 < x < 2$  aufweist. 35

---

Hierzu 4 Seite(n) Zeichnungen

---

40

45

50

55

60

65



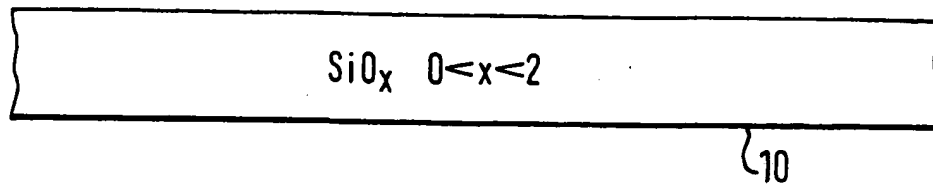


FIG. 1

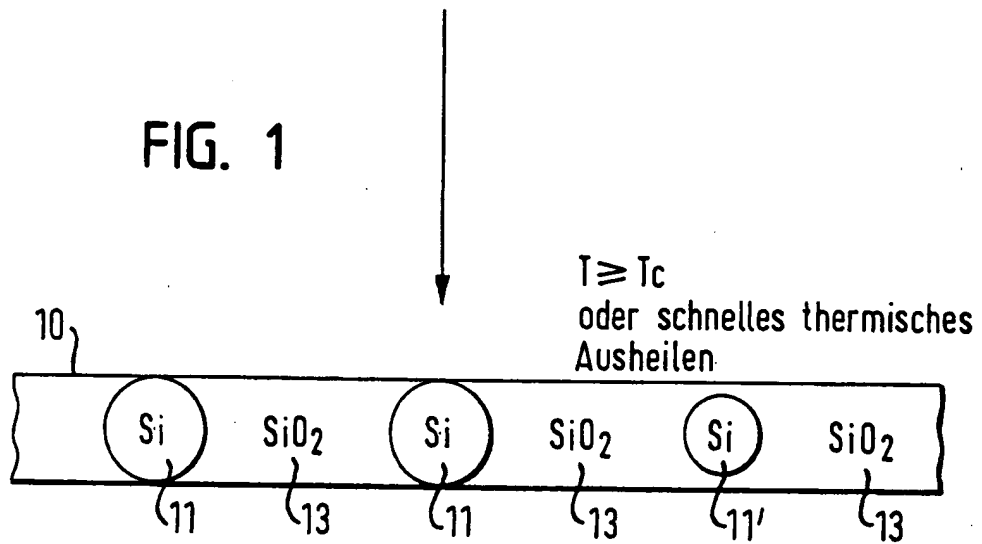


FIG. 2

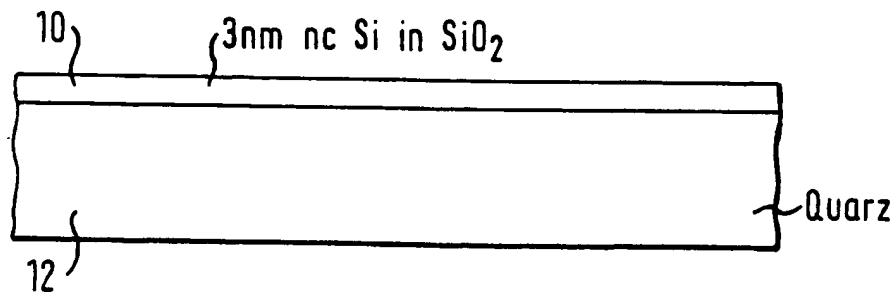


FIG. 3

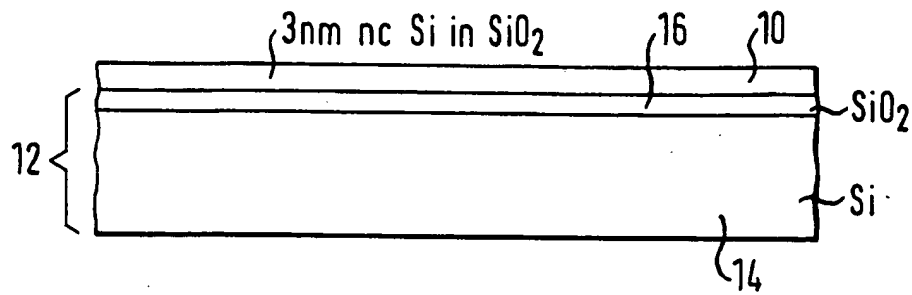


FIG. 4

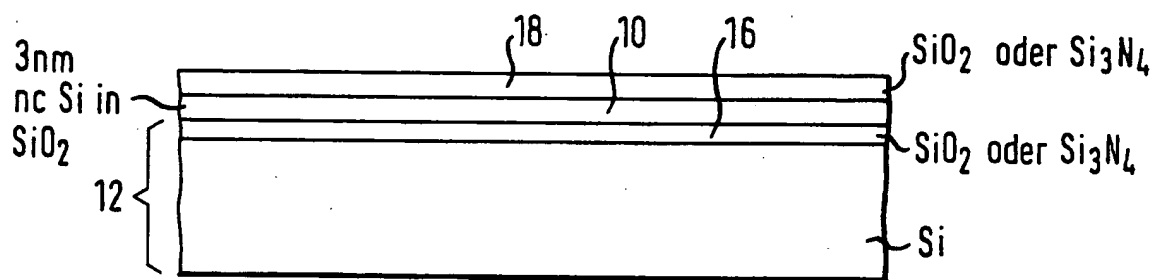
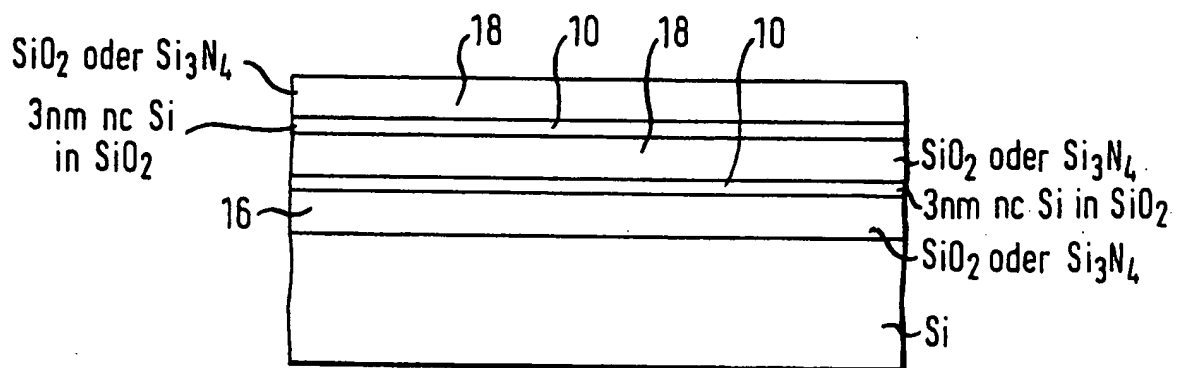


FIG. 5



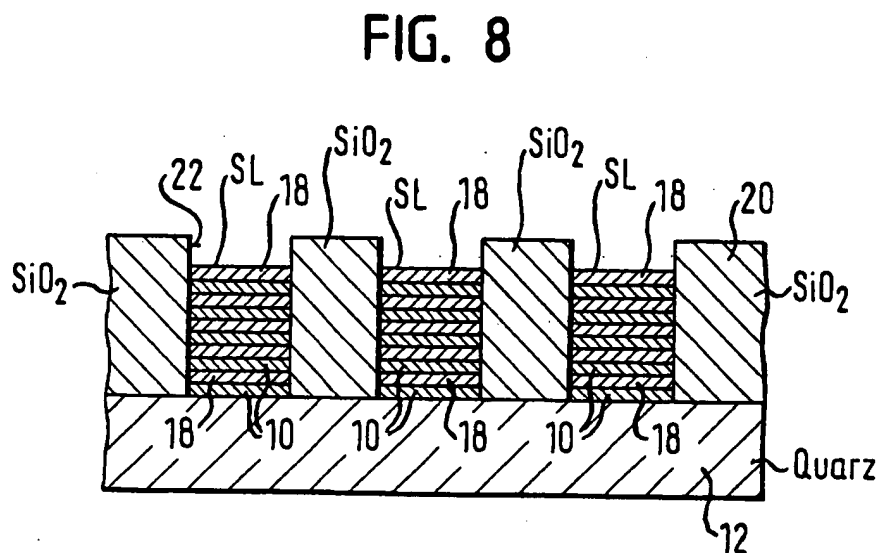
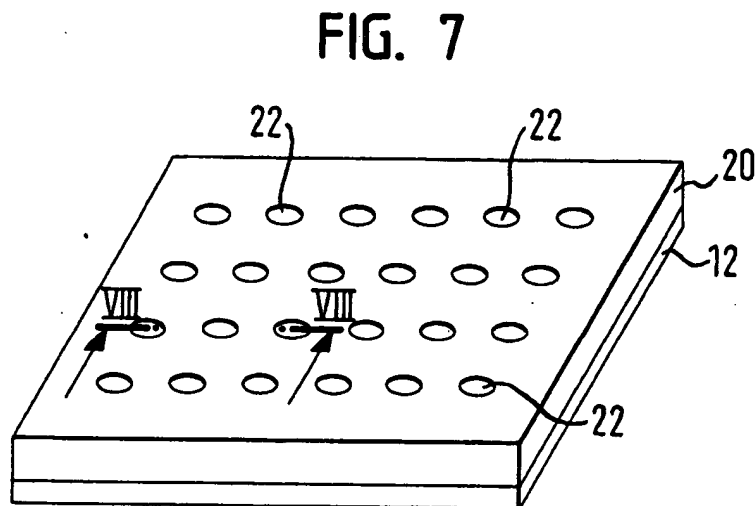
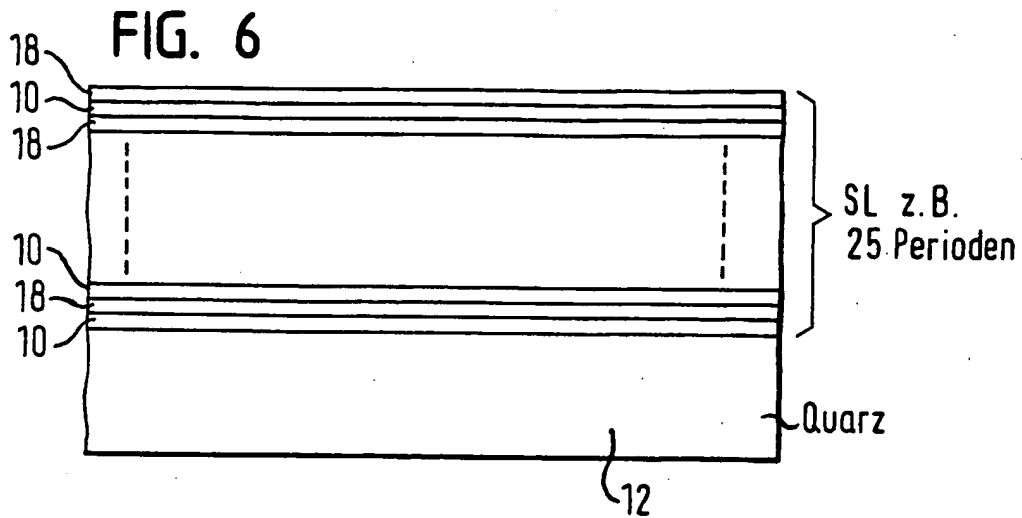


FIG. 9

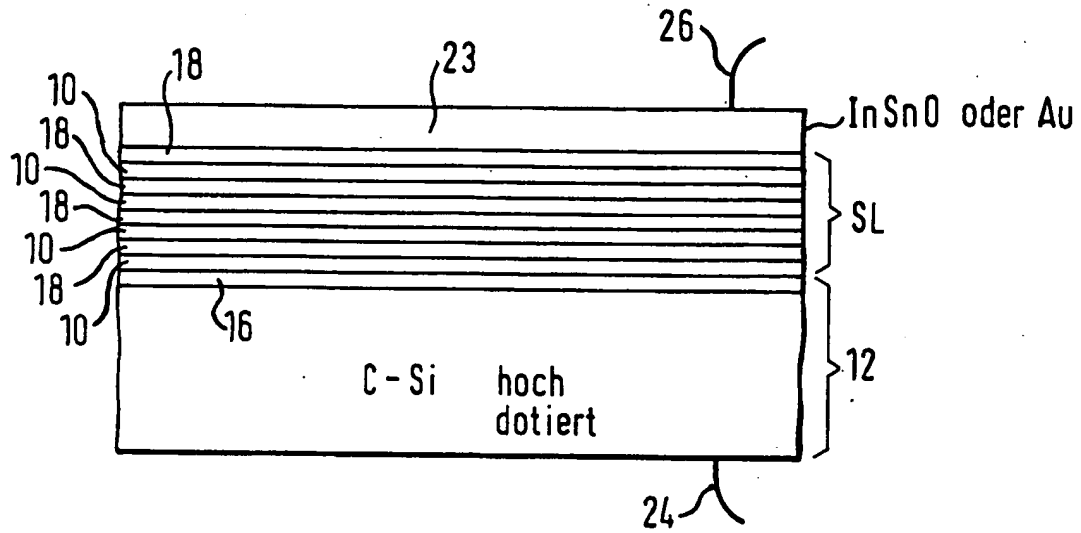


FIG. 10

